



VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Mechanické testování plastových vzorků vyrobených 3D tiskem

Mechanical Testing of Plastic Prototypes
Made by 3D Printing

Student:

Petr Blaťák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Pagáč Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Blat'ák**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Mechanické testování plastových vzorků vyrobených 3D tiskem**
Mechanical Testing of Plastic Prototypes Made by 3D Printing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky.
3. Návrh experimentálních řešení.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

GIBSON, I; D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 1441911200.

VIRTA, Mikael. *The Capabilities of the Fused Deposition Modeling Machine Ultimakes and its Adjusting for the Bio-medical Research Purposes*. Master of Science Thesis. Examiner: Minna Kellomäko. 2013. 107 p. Faculty of Engineering Sciences. Tampere University of Technology.

Internetové zdroje www.3d-tisk.cz, www.3dhubs.com, <http://www.thingiverse.com>, aj.

ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností: Část 1: Základní principy*. 1997.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018.



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018.

.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Petr Blaťák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hranická 226, Drahotuše, 753 61

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BLAŽÁK, P. *Mechanické testování plastových vzorků vyrobených 3D tiskem*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 44 s. Vedoucí práce: Pagáč, M.

Teoretická část této bakalářské práce se zaměřuje na polymery, mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušení, zejména však na technologie 3D tisku plastových funkčních součástí. Praktická část se zabývá zjišťováním mechanických vlastností plastových vzorků vyrobených 3D tiskem. Zkušební vzorky byly vyrobeny z atomizovaného polyamidu PA 12 na stroji EOS P 396, jenž pracuje na principu technologie SLS. Pro stanovení mechanických vlastností byla zvolena jednoosá tahová zkouška. Výsledné hodnoty poslouží pro dimenzování funkčních součástí a budou využity jako výchozí pro další potřebné testování.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

BLAŽÁK, P. *Mechanical Testing of Plastic Prototypes Made by 3D Printing*: BachelorThesisi. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2018, 44 p. Thesis head: Pagáč, M.

The theoretical part of this bachelor thesis focuses on polymers, mechanical properties of plastics and their testing, especially on technologies of 3D printing of plastic functional parts. Practical part deals with the detection of mechanical properties of plastic samples made by 3D printing. The test specimens were manufactured from atomized polyamide PA 12 on the EOS P 396 machine, working on SLS technology. To determine the mechanical properties, a one-axis tensile test was chosen. The resulting values serve to dimension the functional components and will be used as the default for further testing.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Seznam použitých zkratk.....	9
Úvod	10
1 Polymery	11
1.1 Úvod a historie	11
1.2 Výroba	11
1.2.1 Polymerace.....	12
1.2.2 Polykondenzace	12
1.2.3 Polyadice	12
1.3 Struktura.....	12
1.3.1 Tvar makromolekul	12
1.3.2 Velikost makromolekul	13
1.3.3 Tacticita řetězce	14
1.3.4 Uspořádání makromolekul.....	14
1.4 Dělení polymerů	17
1.4.1 Dle teplotního chování.....	17
1.4.2 Dle postavení na trhu	18
1.4.3 Dle polarity	19
2 Mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušení	20
2.1 Zkouška tahem	23
3 3D Tisk	27
3.1 Úvod a historie	27
3.2 Selective Laser Sintering (SLS).....	28
3.3 Polyamidy a PA 12	30
3.4 EOS P 396	31
4 Praktická část	33

4.1 Návrh experimentu	33
4.2 Průběh experimentu	34
4.3 Vyhodnocení experimentu.....	36
Závěr.....	41
Seznam použité literatury	43
Poděkování.....	44

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Veličina	Jednotka
\bar{x}	Aritmetický průměr	-
ε	Deformace (poměrné prodloužení)	%
ε_t	Deformace při přetržení (celková tažnost)	%
ε_u	Deformace v oblasti Hookova zákona	-
ρ	Hustota	kg/m ³
l	Konečná délka vzorku	mm
σ_y	Mez kluzu v tahu	MPa
σ_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
σ_b	Napětí při přetržení	MPa
σ_u	Napětí v oblasti Hookova zákona	MPa
l_0	Počáteční délka vzorku	mm
S_0	Počáteční plocha průřezu vzorku	mm ²
n	Počet měření	-
μ	Poissonovo číslo	-
E_t	Sekantový modul pružnosti v tahu	MPa
F_y	Síla na mezi kluzu	N
F_m	Síla na mezi pevnosti	N
F_b	Síla při přetržení	N
s	Směrodatná odchylka	-
T_m	Teplota tání	°C
T_f	Teplota viskózního toku	°C
T_g	Teplota zesklenní	°C
l_u	Upínací vzdálenost mezi čelistmi	mm
l_t	Upínací vzdálenost mezi čelistmi po přetržení	mm
a_{cV}	Vrubová houževnatost Charpy	kJ/m ²

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
3DP	Three Dimensional Printing
ABS	Akrylonitril - butadien styren
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
HDPE	High density polyethylen – vysoko hustotní polyethylen
LDPE	Low Density Polyethylen – nízko hustotní polyethylen
PA	Polyamid
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyester
PET	Polyethylentereftalát
PI	Polyimid
PLA	Polylactid Acid – kyselina polymléčná
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styren - akrylonitril
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
UV	Ultra violet – ultrafialové

Úvod

3D tisk dnes nabývá prudkého rozmachu a je stále více využíván pro svou výjimečnost a široké využití. Proto je třeba tyto přelomové technologie dále testovat a rozvíjet, tak aby se staly dostupnějšími. Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část má za cíl shrnout nejdůležitější poznatky o polymerech, mechanických vlastnostech plastů a jejich zkoušení. Zejména se má však zabývat technologiemi 3D tisku plastových funkčních součástí. Praktická část má za cíl stanovit mechanické vlastnosti vzorků vyrobených 3D tiskem technologií SLS z atomizovaného polyamidu PA 12. Postupovat budeme tak, že zvolíme vhodné normalizované metody zkoušení, tak abychom zjistili požadované mechanické vlastnosti. Poté na 3D tiskárně EOS P 396 vyrobíme ve vhodném počtu zkušební vzorky. Vyrobené zkušební vzorky budeme mechanicky testovat na vybraných zkušebních strojích. Nakonec výsledky provedených zkoušek vyhodnotím, případně dodatečně doporučím další zkoušky, úpravu technologie, či jiná opatření, jenž povedou k tíženým výsledkům.

1 Polymery

1.1 Úvod a historie

Polymery jsou makromolekulární převážně organické sloučeniny složené z makromolekul zejména uhlíku, vodíku a dalších prvků jako je chlor, fluor, kyslík či dusík. V makromolekulách se mnohokrát opakuje základní jednotka mer – díl. Polymery se dělí na plasty a elastomery. Plasty se pak dále dělí na termoplasty a reaktoplasty.

Od nepaměti známe přírodní polymery, jako je dřevo či kůže. První experimenty byly provedeny úpravou přírodní gumy procesem vulkanizace, následně byl objeven nitrát celulózy tzv. celuloid a dále vznikl také tzv. celofán. Na počátku 20. století byl z fenolu a formaldehydu vytvořen první syntetický plast zvaný bakelit, později také polyvinylchlorid. V 30. letech 20. století byl objeven například polystyren, polyamid (nylon, silon) a polyetylen. Ve 40. letech polyethylentereftalát (PET) a v 50. letech polypropylen (PP). Masivnější užití v průmyslu bylo již v období po první světové válce a v 50. letech nastal jejich prudký rozmach. Výroba plastů postupně překročila světovou výrobu kovů zejména díky jejich snadnému a levnému zpracování. Další výhody jsou nízká hustota, dobré tepelné a elektrické izolační vlastnosti, dobrá korozní a chemická odolnost, barvitelnost, dobré kluzné vlastnosti (PTFE, PA...), u některých plastů průhlednost a recyklovatelnost, možnost použití odpadu jako palivo, v mnoha případech zdravotní nezávadnost (PP, PE...). Nevýhodou jsou však u běžných materiálů horší mechanické vlastnosti, obzvláště za vyšších teplot, nízká odolnost proti UV záření a nízkým teplotám, hořlavost, tvoření elektrostatického náboje, vysoká teplotní roztažnost, časová závislost mechanických vlastností – creep. Vyvinuty však byly speciální plasty pro inženýrské použití, které v mnoha směrech i značně převyšují některé vlastnosti kovů. (1)(2)(3)(4)

1.2 Výroba

Polymery se vyrábějí nejčastěji synteticky nebo modifikací přírodních makromolekulárních látek jako je kaučuk nebo škrob. Ze základních surovin jako je uhlí, ropa nebo zemní plyn se získávají nízkomolekulární látky – monomery jako je etylén, propylen, butylen, benzen, fenol a jiné. Monomery se pak polyreakcemi slučují na makromolekulární látky – polymery. Makromolekula se vytvoří, pokud bude mít monomer reaktivní skupiny a bude mít schopnost vytvářet chemické vazby. Pokud

vznikne polymer z jednoho druhu monomerů, jde o homopolymer, pokud vznikne z více druhů, jedná se o kopolymer (PP+PE...). Kopolymery mohou mít řetězec, statistický, alternující, blokový nebo roubovaný. Pro zlepšení vlastností se do polymerů přidávají stabilizátory, změkčovadla, plniva, maziva, barviva a další aditiva. Pokud plniva ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti plastu, jedná se o plast plněný. Plasty se zpracovávají nejčastěji vytlačováním, vstřikováním, vyfukováním, odléváním, lisováním, méně často obráběním a svařováním. K výrobě polymerů je užito cca 4 % celkové produkce ropy na světě. V současné době se celosvětová roční produkce plastů vyšplhala na hodnotu 300 mil. tun. Cca 40 % vyrobených plastů se využije na výrobu obalů. V současné době jsou vyvíjeny plasty, které se časem samovolně rozloží účinkem mikroorganismů nebo UV zářením. Zmínit je třeba biopolymery, mezi které patří třeba biologicky odbouratelná kyselina polymléčná (PLA) vyrobená z kukuřičného škrobu. (1)(2)(3)(4)

1.2.1 Polymerace

Při této reakci spolu reagují molekuly monomeru a propojí se do velkého řetězce molekuly polymeru. Takto vzniká například PE, PP, PS. (1)(2)(3)(4)

1.2.2 Polykondenzace

Monomery se slučují do dlouhých řetězců, ale při každém připojení další monomerní jednotky se odštěpí vedlejší produkt. Tímto způsobem vzniká například PES a PA. (1)(2)(3)(4)

1.2.3 Polyadice

Jedná se o reakci dvou odlišných druhů monomerů, které obsahují reaktivní atomové skupiny. Probíhá slučování bez vzniku vedlejšího produktu. Takto se vyrábí například epoxidová pryskyřice a PU. (1)(2)(3)(4)

1.3 Struktura

1.3.1 Tvar makromolekul

Lineární

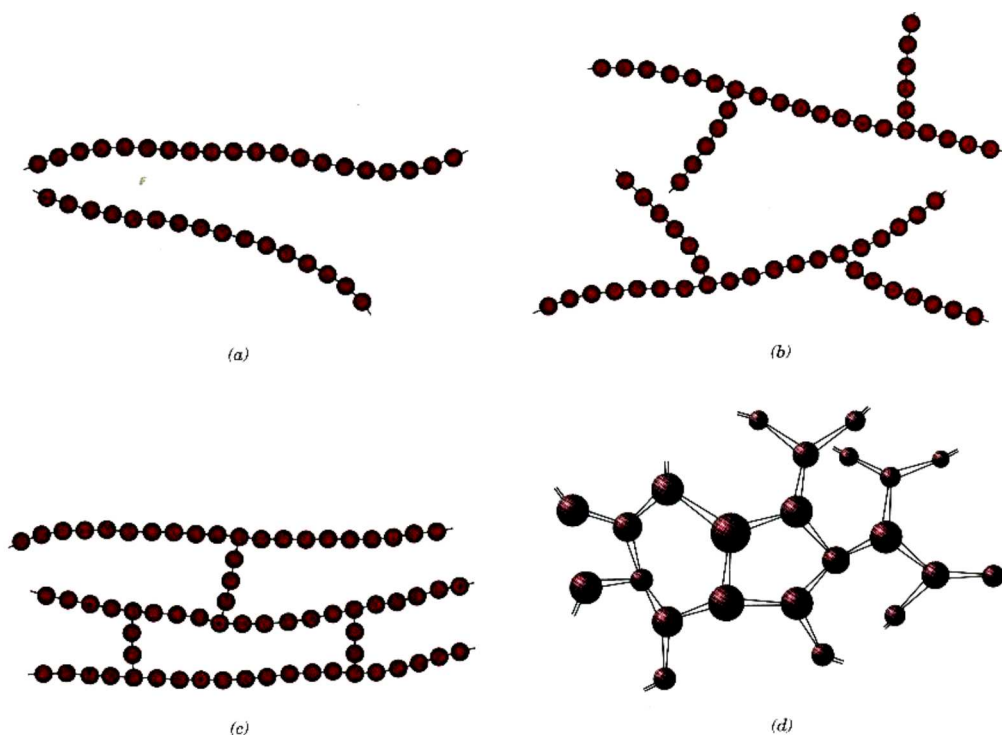
Makromolekuly se vytváří spojováním monomerních jednotek s dvěma funkčními skupinami. Takové polymery se vyznačují vyšší pevností a hustotou (HDPE), teplotní odolností, vyšším modulem pružnosti, nižší tažností. (1)(2)(3)(4)

Rozvětvený

Tyto makromolekuly mají na základním řetězci krátké boční větve. Rozvětvení makromolekul způsobuje pokles sil mezi makromolekulami a díky tomu dochází ke snížení pevnosti, tvrdosti, modulu pružnosti a hustoty (LDPE). (1)(2)(3)(4)

Zesítěný

Vzniká z lineárních nebo mírně rozvětvených makromolekul spojením sousedních řetězců na různých místech příčnými vazbami. Zesítěním se omezí pohyblivost makromolekul. Tyto polymery ztrácí rozpustnost, tavitelnost, zhoršuje se jejich houževnatost a naopak se zvyšuje tvrdost, modul pružnosti a teplotní odolnost. Výsledné vlastnosti závisí na hustotě zesítění. Síťování pryskyřic se nazývá vytvrzování. Rozlišujeme plošné a prostorové zesítění. Mezi tyto polymery patří elastomery a reaktoplasty. (1)(2)(3)(4)



Obrázek 1.1: Molekulární struktura: a) lineární, b) rozvětvený, c) plošně zesítěný, d) prostorově zesítěný (4)

1.3.2 Velikost makromolekul

Tuto veličinu vyjadřujeme molární hmotností nebo polymeračním stupněm. Molární hmotnost makromolekul je dohodou stanovena od 10^3 g/mol. Počet monomerních jednotek v makromolekulárním řetězci udává polymerační stupeň. Čím vyšší molární hmotnost tím vyšší pevnost, modul pružnosti a nižší tažnost. Většinou se polymery skládají z řetězců různých délek. Strukturu polymeru, které obsahují makromolekuly

různých velikostí, charakterizuje polydisperzita. V polymerech převažuje vazba kovalentní. S rostoucí délkou molekul roste pevnost. (1)(2)(3)(4)

1.3.3 Tacticita řetězce

Izotaktický

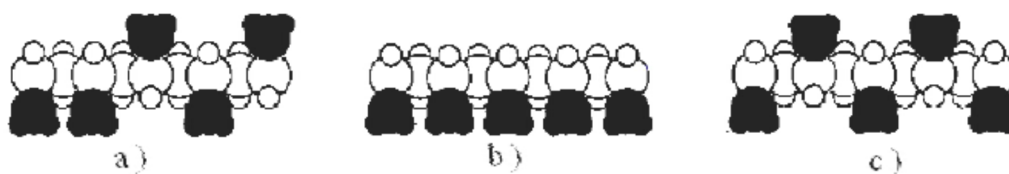
Pravidelné uspořádání substituentů, na jedné straně roviny uhlíkového řetězce. Substituenty jsou atomy, které nahrazují vodík v řetězci uhlovodíku, příkladem je například skupina CH_3 v molekule propenu. Tento typ uspořádání vykazuje nejvyšší hustotu, pevnost a tuhost polymeru. Podíl izotakticity stanovuje index izotakticity. (1)(2)(3)(4)

Syndiotaktický

Pravidelně střídavé uspořádání substituentů nad i pod rovinou řetězce. (1)(2)(3)(4)

Ataktický

Nahodilé uspořádání substituentů na obou stranách roviny uhlíkového řetězce. (1)(2)(3)(4)



Obrázek 1.2: Tacticita řetězce: a) ataktický, b) izotaktický, c) syndiotaktický

ZDROJ:

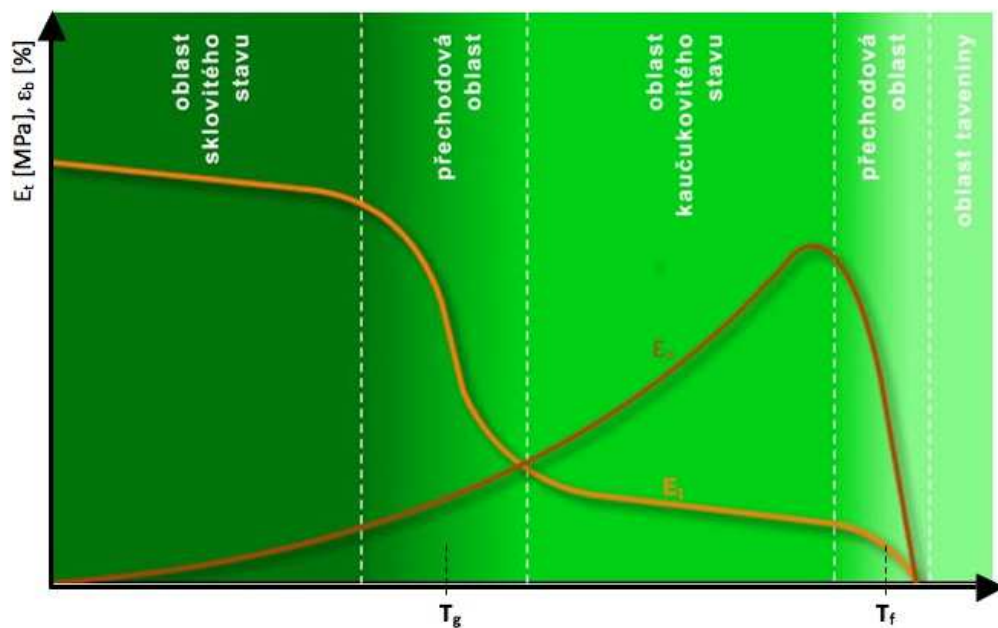
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17446

1.3.4 Uspořádání makromolekul

Amorfní

Náhodné uspořádání makromolekul, které mohou být vzájemně propleteny. Základním morfologickým útvarem jsou chaoticky stočené makromolekuly nazývané globuly. Amorfní termoplasty jsou teoreticky použitelné do teploty zesklenní T_g , protože na této teplotě dochází ke skokové změně ze stavu sklovitého do stavu kaučukovitého a tím k fatálnímu zhoršení pevnosti. Za běžných podmínek se tedy vyskytují ve stavu tvrdém a křehkém. Maximální teplota použitelnosti však závisí zejména na velikosti, době a typu mechanického namáhání. Na taveninu se tyto polymery mění na teplotě viskózního toku T_f . Charakteristická závislost modulu

pružnosti a deformace při přetržení na teplotě je patrná z *Obrázek 1.3*. Žádné polymery se nevyskytují v plynném stavu, jelikož jejich teplota varu je vyšší než teplota rozkladu a to díky makromolekulám. Stavové změny jsou pozvolné a přechodové teploty vyjadřují pouze střední teploty daných stavů a to díky polydisperzitě. Tyto plasty bývají běžně čiré nebo průhledné a patří zde PC, PMMA, PVC, ABS ($T_g = 105^\circ\text{C}$), PS, PLA, PI ($T_g = 400^\circ\text{C}$). Řadí se zde i elastomery a reaktoplasty, které jsou zesíťované a netavitelné, proto vykazují dobrou pevnost i nad teplotou T_g a teoreticky až do teploty rozkladu. (1)(2)(3)(4)

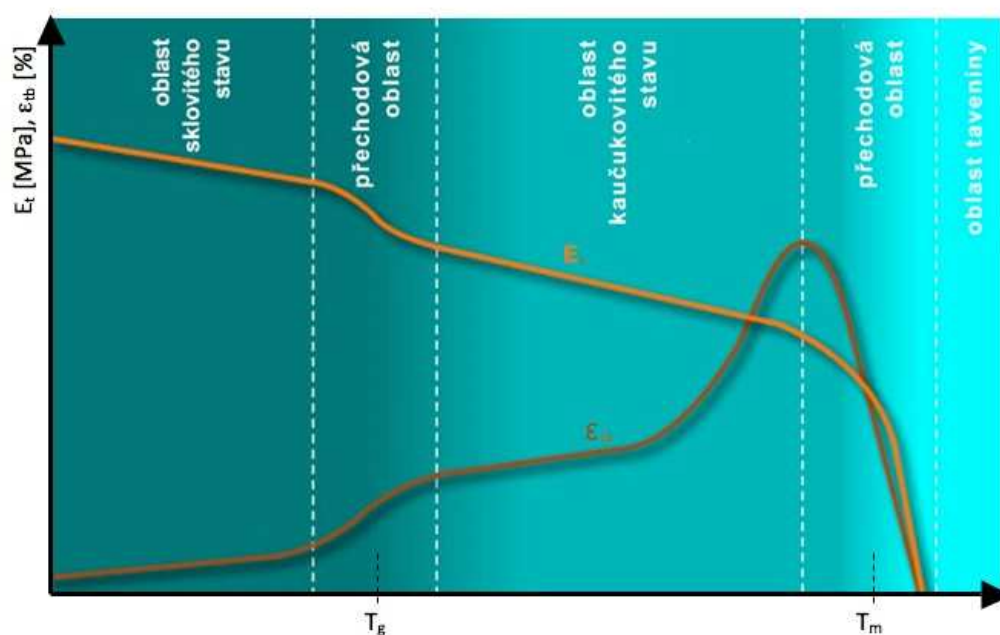


Obrázek 1.3: Charakteristická závislost modulu pružnosti a deformace při přetržení na teplotě u amorfního termoplastu (2)

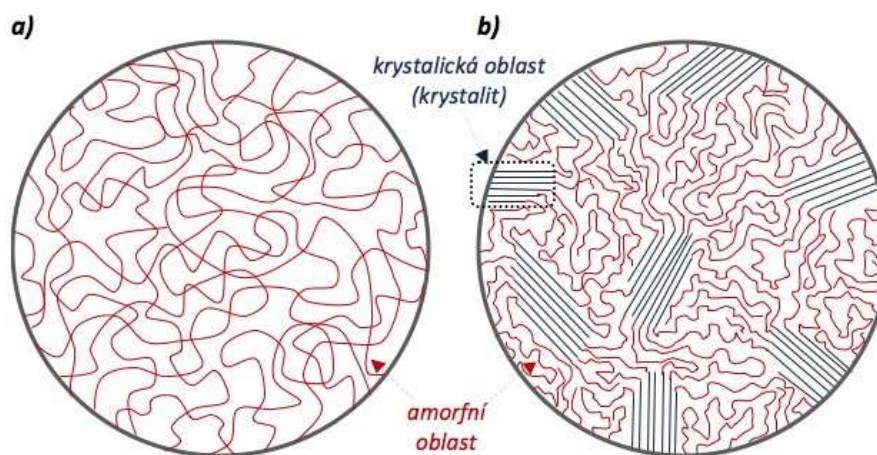
Semikrystalické

Makromolekuly vytvářejí amorní i krystalické oblasti. V těchto polymerech vznikají při tuhnutí shluky lamel tzv. sférolity. Množství krystalické fáze vyjadřuje stupeň krystalinity. S rostoucím stupněm krystalinity roste pevnost. Ke vzniku semikrystalické struktury je zapotřebí vznik krystalizačních zárodků tzv. nukleace, ke které dochází při tuhnutí amorní taveniny nad T_g a pod teplotou tání T_m . Amorní a semikrystalické uspořádání makromolekul je znázorněno na *Obrázek 1.5*. Důležitým aspektem je také rychlost krystalizace polymeru, čím rychleji se polymer ochladí, tím méně vznikne krystalů. Tyto polymery jsou použitelné teoreticky až do T_m , což je teplota tání krystalické složky. Na teplotě T_g dochází k lehké změně z křehké sklovité oblasti do houževnaté aučukovité oblasti a mírnému snížení pevnosti a to díky amorní složce. Na teplotě T_m dochází k výrazné skokové změně z tuhého do kapalného stavu a zásadnímu snížení

pevnosti. Charakteristická závislost modulu pružnosti a deformace při přetržení na teplotě je vidět z *Obrázek 1.4*. Například zde řadíme PELD ($T_g = -120^\circ\text{C}$, $T_m = 105^\circ\text{C}$) a PA 6 ($T_g = 50^\circ\text{C}$, $T_m = 215^\circ\text{C}$). (1)(2)(3)(4)

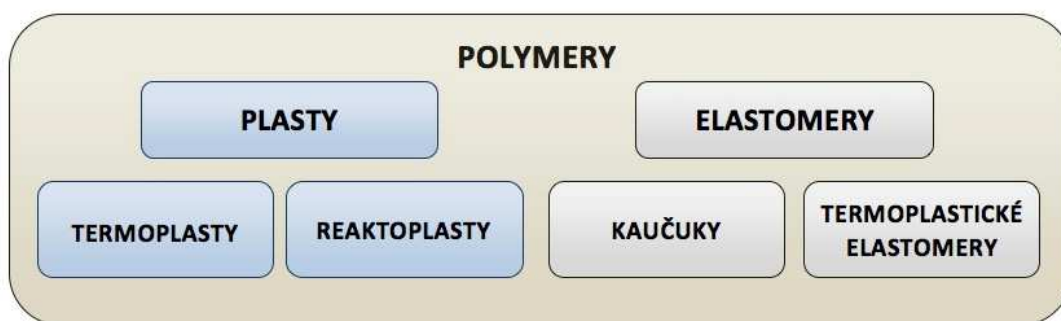


Obrázek 1.4: Charakteristická závislost modulu pružnosti a deformace při přetržení na teplotě u semikrystalického termoplastu (2)



Obrázek 1.5: Nadmolekulární struktura: a) amorfni, b) semikrystalické (2)

1.4 Dělení polymerů



Obrázek 1.6: Dělení polymerů (2)

1.4.1 Dle teplotního chování

Plasty

Termoplasty

Jedná se o plasty, které při zahřívání přechází do plastického stavu a lze je tak opakovaně tvářet. Po ochlazení přechází opět do tuhého stavu beze změn jejich struktury. Mohou být amorfní i semikrystalické. Dají se snadno recyklovat. Patří mezi ně například PE, PP, PS, PVC. (1)(2)(3)(4)

Reaktoplasty

U těchto plastů dochází po zahřátí k nevratné změně struktury, po které již nelze materiál znovu tepelně zpracovat. Chemická reakce způsobuje zesítnění polymeru tzv. vytvrzení. Tyto plasty jsou amorfní a mají vysokou chemickou a tepelnou odolnost, tvrdost a tuhost. Do této skupiny patří fenoplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery a polyuretany. Typickými zástupci jsou epoxidové, formaldehydové pryskyřice, bakelit a PUR. (1)(2)(3)(4)

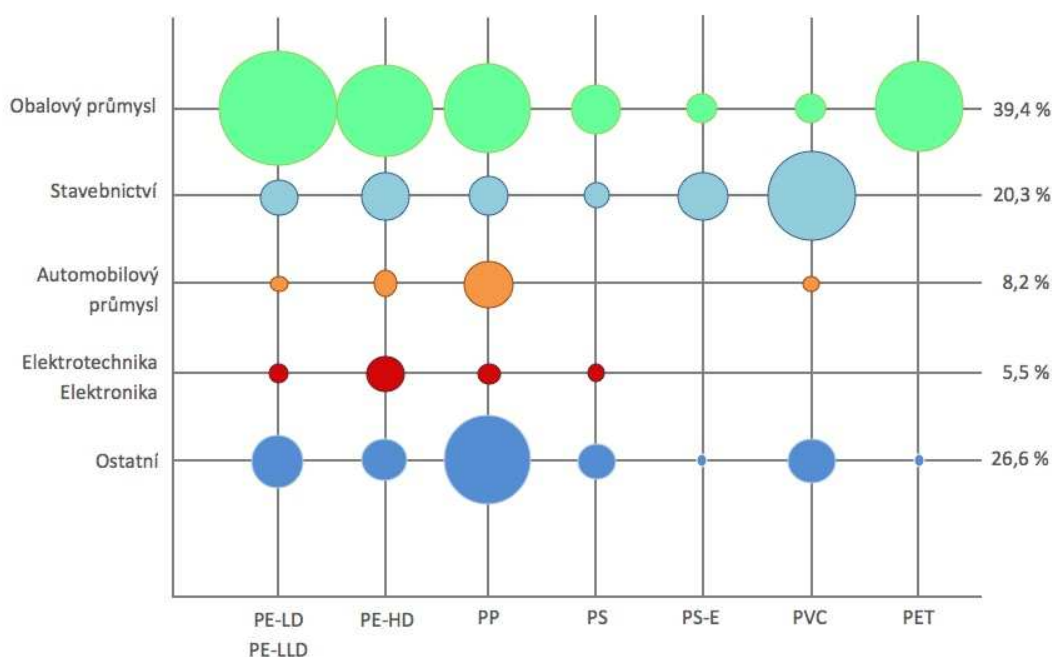
Elastomery

Jde o elastické polymery s nízkou tuhostí, které lze vratně deformovat. Patří zde kaučuky, z nichž se zesítněním – vulkanizací vyrábí pryže, které mají amorfní strukturu. Řadíme zde například olejovzdorný akrylátový kaučuk nebo teplovzdorný silikonový kaučuk. Existují také termoplastické elastomery, které jsou zpracovatelné jako termoplasty. (1)(2)(3)(4)

1.4.2 Dle postavení na trhu

Komoditní

Do této skupiny patří nejpoužívanější a nejlevnější plasty jako jsou PET, PS, PP, PE a PVC. Jsou využívány především pro méně náročné aplikace pro obalový průmysl a ve stavebnictví. Všechny výše zmíněné plasty jsou recyklovatelné. Z *Obrázek 1.7* je vidět, že nejvyužívanějšími plasty v Evropě jsou PE, PP a PET v obalovém průmyslu a PVC ve stavebnictví. (1)(2)(3)(4)



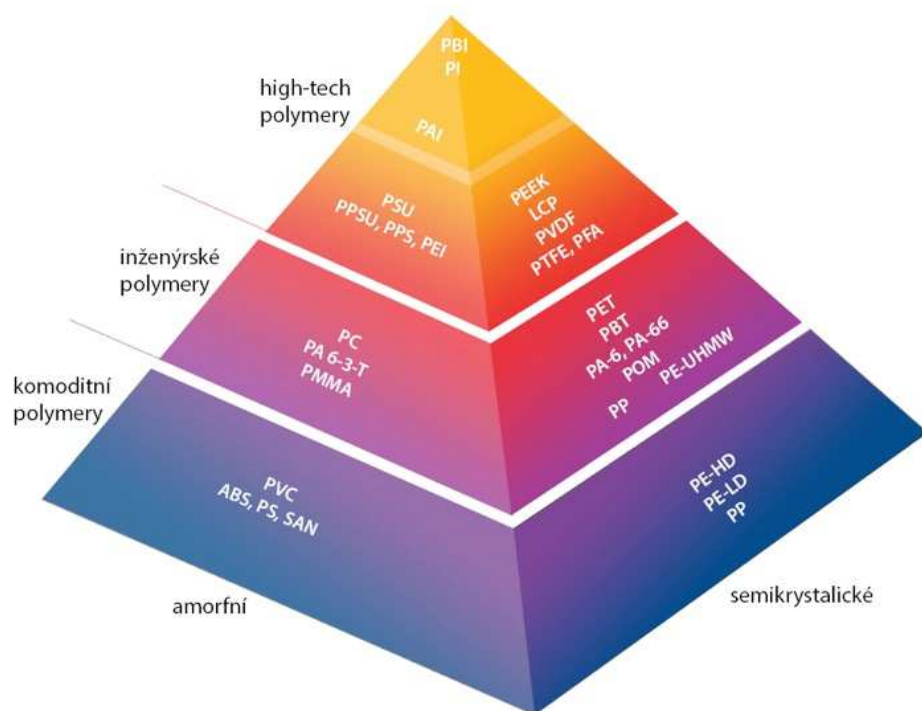
Obrázek 1.7: Spotřeba komoditních plastů v Evropě (2)

Inženýrské

Tyto plasty vykazují lepší mechanické a fyzikální vlastnosti a jsou tak vhodné pro konstrukční účely. Řadíme zde například polyamidy, POM, ABS, PMMA. Tyto plasty jsou v samotném středu pomyslné pyramidy, která je zachycena na *Obrázek 1.8*. (1)(2)(3)(4)

Speciální

Plasty pro speciální použití, které vykazují nadstandartní vlastnosti a to například vysokou teplotní odolnost, elektrickou vodivost, vysokou pevnost, nízké tření. Typické jsou imidové plasty, fluoroplasty a některé polyamidy. Zmínit je třeba i polymerní směsi, které kombinují za běžných podmínek i nemísitelné polymery (polární/nepolární, amorfni/semikrystalické), řadíme zde i kopolymery jako je kombinace PP+PE. Dále zde patří například PI, PSU, PEEK. Tyto plasty se některými vlastnostmi minimálně rovnají kovům a tak je ve značném množství případů již nahrazují. (1)(2)(3)(4)



Obrázek 1.8: Dělení polymerů dle postavení na trhu (2)

1.4.3 Dle polarity

Polární

Mají trvalý dipól, protože náboje jsou rozmístěny nesymetricky a obsahují kyslík a dusík. Rozpouštějí se v polárních rozpouštědlech (voda, líh) a vykazují větší pevnost, protože mají větší meziatomové síly. Jsou méně odolné vůči kyselinám, zásadám a oxidačním činidlům s výjimkou fluoroplastů. Řadíme sem například polyamidy, které jsou náchylnější k navlhnutí. (1)(2)(3)(4)

Nepolární

Nemají trvalý dipól, protože mají symetricky rozmístěné náboje. Jsou odolné nepolárními rozpouštědly (benzín). Patří sem třeba PP, PE, PS. (1)(2)(3)(4)

2 Mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušení

Mechanické zkoušky se dělí dle časového hlediska na krátkodobé a dlouhodobé, dle charakteru působící síly na statické (klidná síla) a dynamické (síla proměnná s časem), dle teploty na zkoušky za normální teploty a za abnormálních teplot, dle způsobu namáhání na tahové, tlakové, ohybové, krutové, smykové a kombinované.

Vlastnosti polymerů nejvíce ovlivňuje chemické složení, tvar, velikost a uspořádání makromolekul a síly mezi nimi, teplota a vlhkost okolí, UV záření, způsob, velikost, doba a charakter zatížení a technologie zpracování materiálu. Vliv teploty na zatížení PA 66 při tahové zkoušce je znázorněn na *Obrázek 2.1* a vliv vlhkosti zase na *Obrázek 2.3*. Vliv rychlosti zatěžování tahovou silou při tahové zkoušce termoplastu je patrný na *Obrázek 2.2*. Veškeré vlastnosti a informace o materiálu bývají zahrnuty v materiálovém listě. Pro ověření vlastností materiálu slouží inspekční list vydaný výrobcem. Tento dokument obsahuje u termoplastů zejména index toku taveniny, obsah popela, hustotu, zbytkovou vlhkost.

Zkoušky se provádějí experimentálně dle norem na zkušebních vzorcích vyrobených předepsanými technologiemi. Deformace mohou být elastické (pružné) a to pokud se těleso po skončení zatížení vrátí do původního stavu nebo plastické (trvalé), a to jestliže se těleso po skončení zatížení nevrátí do původního stavu.

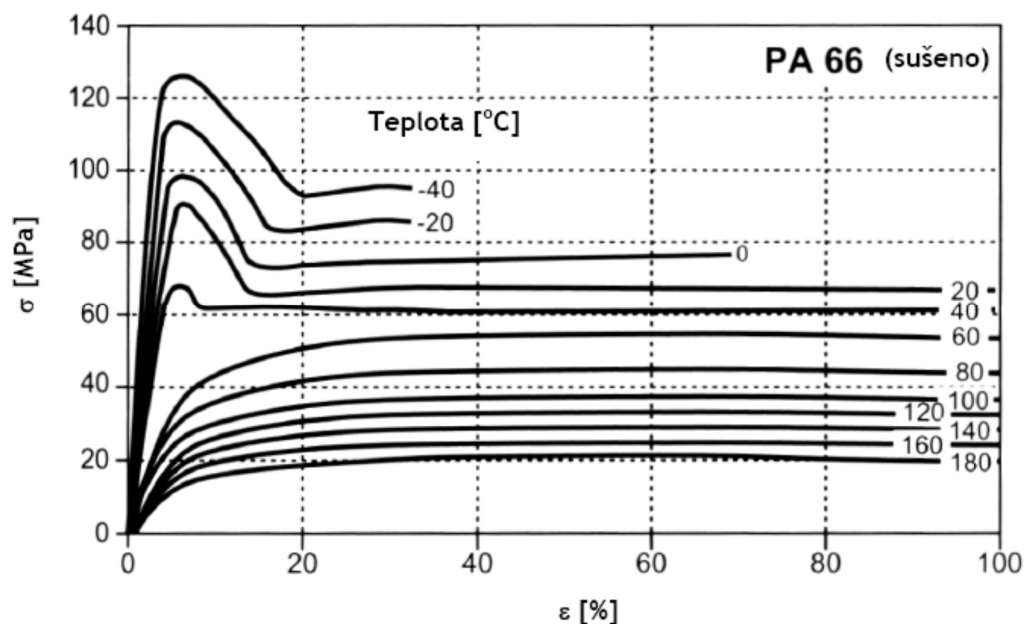
U polymerů dochází navíc ke zpožděné elastické deformaci – viskoelasticitě. Při dlouhodobém zatížení roste deformace a její rychlost s časem klesá, dochází ke creepu – tečení. Po přerušení zatížení se snaží těleso vrátit do původního stavu, dochází k elastickému zotavení – zpětnému creepu. Počáteční změna tvaru polymeru je způsobena pružnou deformací. K udržení konstantní deformace polymeru v závislosti na čase je třeba stále nižší napětí, dochází k jevu zvaný relaxace napětí. Deformace polymerů je časově závislá, proto jsou směrodatnější dlouhodobé statické zkoušky, které jsou však časově a finančně náročnější. K těmto zkouškám se řadí creepové zkoušky, které se provádějí za různých teplot nejčastěji při namáhání v tahu konstantní silou. Výsledkem jsou creepové křivky závislosti deformace na čase, ze kterých lze odečtením deformace v daném čase pro různé hodnoty napětí sestavit isochronní křivky závislosti napětí na deformaci ke zjištění creepového modulu pružnosti.

Mezi nejběžnější statické zkoušky patří tahová zkouška ke zjištění zejména tažnosti, meze kluzu, meze pevnosti a modulu pružnosti, zkoušky tvrdosti dle Shorea, Brinella

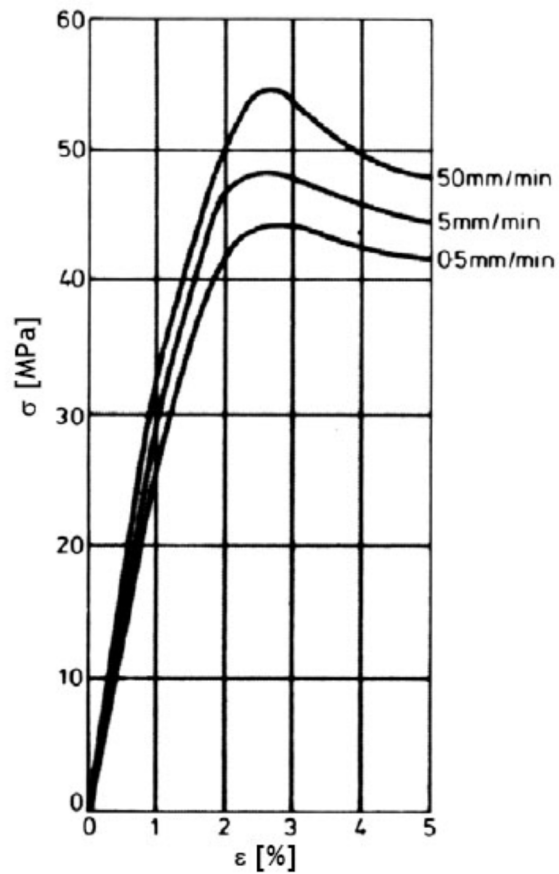
nebo Rockwella. Tlakové vlastnosti jsou u houževnatých polymerů totožné s tahovými, u křehkých pevnost v tlaku převyšuje pevnost v tahu. K méně běžným patří statické zkoušky ohybem, krutem a stříhem.

K častým dynamickým rázovým zkouškám patří zkouška vrubové houževnatosti dle Charpyho nebo Izoda, které zjišťují kolik energie je spotřebováno na porušení zkušebního vzorku s vrubem ve tvaru písmene U, nebo V. Zkouška se může provádět za různých teplot, aby mohl být sestrojen graf závislosti vrubové houževnatosti na teplotě, pomocí něhož se zjistí tranzitní teploty přechodu z křehkého do houževnatého lomu. Provádí se i zkouška rázové houževnatosti, kdy vzorek postrádá vrub. Poměr rázové a vrubové houževnatosti určuje citlivost materiálu na koncentraci napětí, čím je poměr vyšší, tím je materiál náchylnější. Polymery, u nichž je teplota zesklenní nižší než standardní teplota, jsou ve stavu houževnatém, proto k přeražení vzorku nedojde a je třeba vzorek opatřit vrubem.

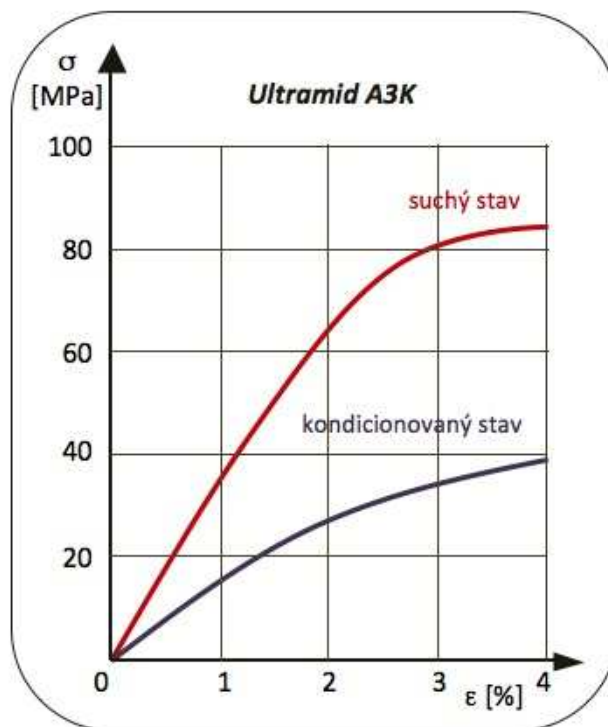
Ke zjištění časové meze únavy pro stanovený počet cyklů typicky 10^7 nebo meze únavy do vzniku únavového lomu, slouží dynamické únavové zkoušky při cyklickém namáhání v tahu, tlaku, ohybu nebo krutu, které mohou mít pulsující, míjivý nebo střídavý charakter. Průběh zkoušky se zaznamenává do grafu nazývaného Wöhlerova křivka, kde lze vidět, že se vzrůstajícím počtem cyklů je k porušení vzorku zapotřebí stále nižší napětí. Orientační hodnoty vlastností často užívaných termoplastů jsou seskupeny v *Tabulka 2.1. (1)(2)(3)(4)*



Obrázek 2.1: Vliv teploty na pevnost v tahu u PA 66 (4)



Obrázek 2.2: Vliv rychlosti deformace na pevnost v tahu termoplastu (4)



Obrázek 2.3: Vliv vlhkosti na pevnost v tahu u PA 66 (2)

Tabulka 2.1: Orientační hodnoty některých vlastností vybraných termoplastů

ZDROJ: <http://www.akplast.cz/technick-e-informace>

Vlastnost	Semikrystalický termoplast					Amorfní termoplast			
	PE - HD	PP	PA 6	PA 66	PET	PLA	ABS	PC	PVC
T_g (°C)	-110	10	60	47	98	120	145	150	80
T_m (°C)	130	165	220	260	245	-	-	-	-
ρ (kg/m ³)	950	910	1130	1140	1390	1288	1040	1200	1360
E (MPa)	1040	1635	3330	3470	3445	2800	2210	2370	3040
σ_m (MPa)	5	28	54	84	90	33	33	70	30
Navlh. (%)	0,01	0,01	2,8	2,6	0,5	2	0,1	0,15	0,2
ϵ_t (%)	70	30	50	70	15	3	8	3	10
α_{cv} (kJ/m ²)	20	9	7	5	2	3	37	9	3

2.1 Zkouška tahem

Trhací zkouška tahem je nejrozšířenější statická zkouška, díky které lze získat základní mechanické vlastnosti materiálu jako je mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti a tažnost. Zkušební normalizovaný vzorek kruhového nebo obdélníkového průřezu je zatížen jednoosým tahem. Rychlost zatěžování vzrůstá konstantní rychlostí až do přetržení vzorku nebo na předem stanovenou hodnotu prodloužení nebo síly. Standardně se zkouška provádí za běžné okolní teploty. Průběh deformace tedy závislost prodloužení Δl na síle F , vyhodnocujeme pomocí deformační křivky pracovního diagramu $F - \Delta l$. Vzorek je pevně, ale nenapnutě uchycen nejčastěji do samosvorných čelistí zkušebního stroje a může na něj být nasazen průtahoměr. Podrobnější popis mechanického a hydraulického zkušebního stroje je na *Obrázek 2.6*. Při zkoušce se dynamometrem snímá zatěžující síla a průtahoměrem nebo z pohybu příčníků stroje prodloužení. Na zkušebním vzorku je zaznačena počáteční měřená délka l_0 a to tak, aby nebyl vzorek ovlivněn vrubem. Abychom mohly porovnávat mechanické vlastnosti materiálů mezi sebou, je třeba převést zatěžující sílu na napětí. V praxi zavádíme smluvní napětí, které neuvažuje změnu průřezu vzorku při zatížení, ale počítá s počátečním průřezem vzorku S_0 . Prodloužení převádíme na prodloužení poměrné – deformaci a tím vznikne smluvní diagram tahové zkoušky $\sigma - \epsilon$. V první fázi bývá u většiny materiálů prodloužení zkušební tyče přímo úměrné zatěžující síle a to až do meze úměrnosti. Jedná se tedy o přímkovou závislost, kde platí tzv. Hookův zákon. V této oblasti se zjišťuje

modul pružnosti, případně u houževnatých materiálů bez přímkové závislosti tzv. sekantový modul pružnosti. Modul pružnosti charakterizuje tuhost materiálu. Poté již prodloužení nebývá přímo úměrné zatěžující síle. Nastává mez pružnosti, což je mezní napětí, které po odlehčení nevyvolá trvalé deformace. Při dalším zvyšování síly nastává již trvalá deformace, kdy po odlehčení vzorek nenabude původní délky. Zde stanovujeme mez kluzu, kterou definujeme jako nejmenší napětí, které způsobuje podstatnou plastickou deformaci. Na vzorku se začíná tvořit krček. Pokud se na křivce objeví pokles napětí, stanovujeme horní a dolní mez kluzu, tak jak je patrné z *Obrázek 2.5*. Některé materiály mají plynulou křivku s nevýraznou mezí kluzu, proto u nich můžeme stanovit smluvní mez kluzu například při 0,2 % deformace. Typické deformační křivky tahové zkoušky polymerů jsou patrné z *Obrázek 2.4*. Po mezi kluzu se materiál prodlužuje mnohem rychleji, aniž by se výrazně zvyšovalo napětí. Největší naměřené napětí odpovídá mezi pevnosti. Nakonec dochází k přetržení vzorku, kdy se vyhodnocuje poměrné prodloužení neboli deformace při přetržení vzorku, která charakterizuje celkovou tažnost materiálu. (1)(2)(3)(4)

Napětí na mezi kluzu:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{S_0} \text{ (MPa)}$$

(2.1)

Napětí na mezi pevnosti:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (MPa)}$$

(2.2)

Napětí při přetržení:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \text{ (MPa)}$$

(2.3)

Deformace (poměrné prodloužení):

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

(2.4)

Deformace při přetržení (celková tažnost)

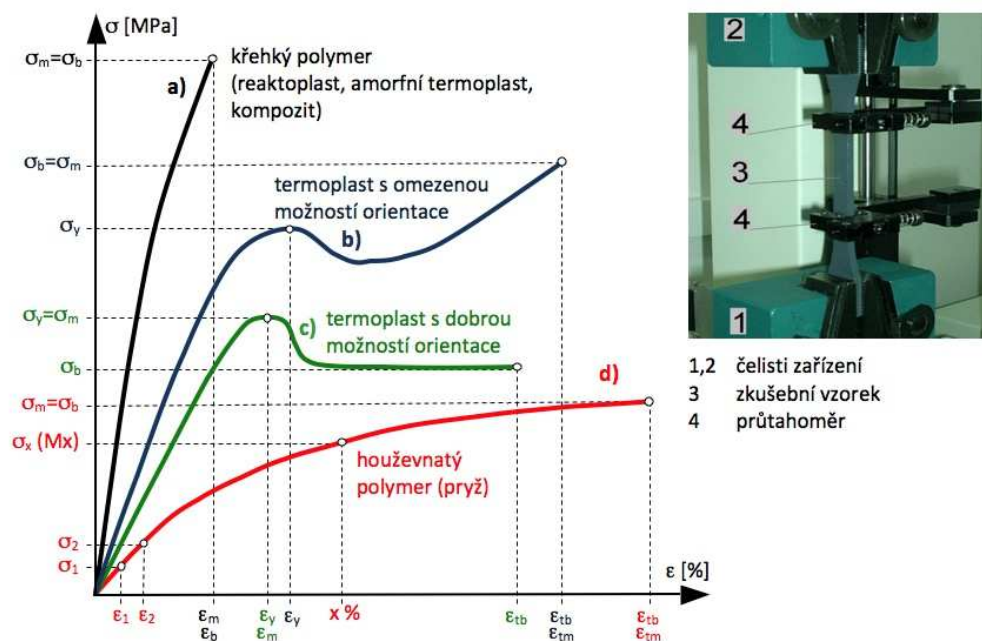
$$\varepsilon_t = \frac{l_t - l_u}{l_u} \cdot 100 = \frac{\Delta l_t}{l_u} \cdot 100 (\%) \quad (2.5)$$

Modul pružnosti:

$$E = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\text{MPa}) \quad (2.6)$$

Sekantový modul pružnosti:

$$E_t = \frac{\sigma_{u+1} - \sigma_u}{\varepsilon_{u+1} - \varepsilon_u} \text{ (MPa)} \quad (2.7)$$



Obrázek 2.4: Typické deformační křivky polymerů v tahu (2)

3 3D Tisk

3.1 Úvod a historie

3D tisk či aditivní technologie jsou moderní metody výroby objektů z CAD 3D modelů. Výsledný produkt vzniká postupným nanášením a spojováním tenkých vrstev materiálu za působení tepla. Tato technologie je vhodná převážně pro rychlou výrobu prototypů, náhradních dílů, výrobků na míru a kusovou případně malosériovou výrobu složitějších dílů. V mnoha případech se šetří čas, peníze i hmotnost výrobku, protože nejsou potřeba žádné speciální obráběcí nástroje, formy a přípravky. Je zde vysoká využitelnost materiálu, často odpadají dokončovací operace v podobě obrábění, kromě odstranění případných podpěr. Samotný funkční díl lze vyrobit jako monolit a není třeba spojovat konvenčně vyrobené díly do složitých a hmotných sestav. Uplatní se v leteckém a kosmickém průmyslu pro výrobu složitých dílů z těžkoobrobitelných materiálů, pro výrobu forem na lisování plastů s konformním chlazením a ve zdravotnictví například pro výrobu titanových implantátů. Nevýhodou může být vysoká pořizovací cena 3D tiskárny, omezené použití materiálů, většinou jednobarevný tisk, omezená velikost výrobků, neefektivita pro větší série jednoduchých naprosto totožných výrobků, horší drsnost povrchu a nutnost například leštění laserem, nižší přesnost a potřeba obrábění funkčních ploch. U některých metod je možnost vzniku vnitřních strukturních vad, které se dají částečně ovlivnit optimalizací procesu a konečným tepelným zpracováním.

Počátky 3D tisku sahají do 80. let minulého století, kdy vznikla přesná technologie stereolitografie (SLA), která spočívá ve vytvrzování fotopolymerové pryskyřice UV laserem. V roce 1989 byla patentována technologie selektivního spékání laserem (SLS), kdy se laserem v počátcích spékal plastový ABS prášek, později i další materiály. Tato technologie již umožňovala tisk funkčních výrobků. V 90. letech se rozmohla technologie Fused Deposition Modeling (FDM), která se později rozšířila do kanceláří a domácností. Touto metodou je z cívky odmotávána plastová struna, která se v trysce taví a poté po vrstvách nanáší na pracovní plochu. Dnes se experimentuje například s tiskem oblečení, potravin, plnobarevným tiskem i různých materiálů a tiskem voskových modelů pro odlévání. Budoucností je tisk lidských funkčních orgánů a užití těchto technologií pro výrobu náhradních dílů a obydlí ve vesmíru. (5)(6)(7)(8)(9)(10)(11)

3.2 Selective Laser Sintering (SLS)

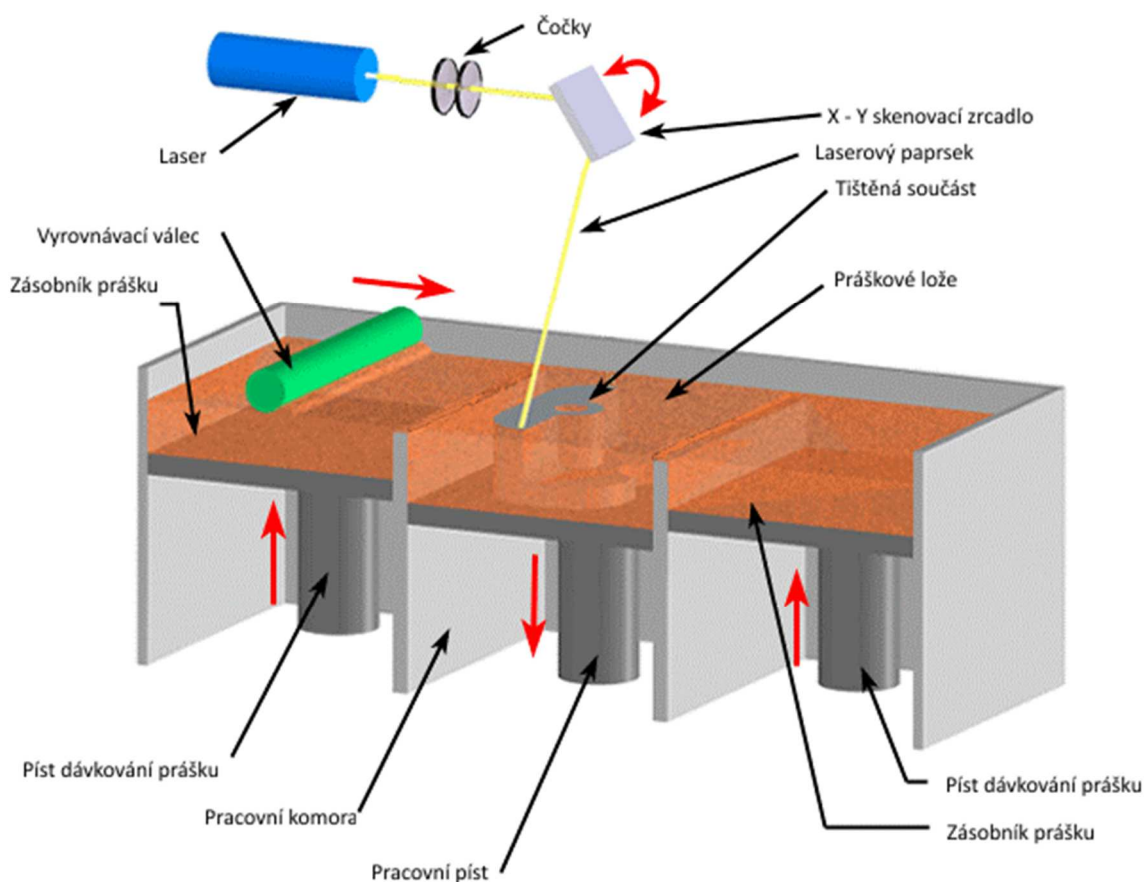
Touto metodu byly vyráběny zkušební vzorky, jejichž zkoušením se dále zabývá praktická část této práce. Technologie se začala vyvíjet již v 80. letech minulého století na Texaské univerzitě v Austinu a v roce 1989 byla patentována. Tato profesionální metoda spočívá u amorfních materiálů (ABS) ve spékání nebo u krystalických (kovy) či semikrystalických (PA) materiálů spíše v tavení atomizovaného materiálu laserem s automatickým zaměřováním. Amorfní materiály nemají teplotu tání, mají pouze teplotu zesklenní, proto nemohou být plně roztaveny do stavu kapalného.

Vhodným materiálem jsou plasty (ABS, PA, PLA), méně často kovy nebo slitiny kovů, keramika, sklo či křemičitý písek. Nejtypičtějšími materiály jsou plasty, zejména polyamidy jako je například PA 12. Lepší mechanické vlastnosti vykazují směsi jako je směs polyamidového a hliníkové prášku – Alumidu či směs polyamidového a skelného prášku.

Tisk modelu probíhá tak, že výkonný pulzní laser na bázi oxidu uhličitého taví vrstvu práškových částic daného materiálu do stavu kapalného, tedy na bod tání, v případě neamorfních materiálů. Vrstva prášku se nanáší na celou pracovní plochu a je strojem předeřívána, tak aby se laseru usnadnilo zahřátí na teplotu tání a spojení dané vrstvy, která odpovídá řezu dle vytvořeného a nadefinovaného 3D modelu. Po vytvoření vrstvy se lože sníží o jednu vrstvu, nanese se další vrstva prášku a proces se opakuje, dokud se výrobek nedokončí. Celý výrobek je tedy obklopen po celou dobu výroby práškem, proto většinou není třeba dočasných podpor jako třeba u technologie FDM nebo SLA. Nevyužitý prášek lze opětovně použít. Na jedné pracovní ploše lze současně vytvářet více výrobků, čímž se výroba zrychluje. Pro tisk plastů se rychlost výroby do výšky pohybuje až kolem 22 mm/h a tloušťka vrstvy bývá (0,06 až 0,12) mm. Celý proces probíhá v uzavřeném prostoru, tak aby nedocházelo k úniku tepla a styku prášku a zplodin s obsluhou. Polyamidové výrobky se dají dále barvit, lepit nebo obrábět. Touto metodou lze vytvářet velmi složité výrobky s průchozími dutinami. Takový výrobek je zachycen na *Obrázek 3.2*. Navíc lze použít širokou škálu materiálů. Nevýhodou je, že není možné vytvořit dutý uzavřený prvek, protože by nebylo možné odstranit prášek zevnitř výrobku. Další nevýhodou je vyšší pórovitost povrchu výrobku, kterou lze řešit leštěním například laserem nebo uzavřením struktury. Vnitřní struktura je podobná spíše odlitkům, tudíž lze očekávat horší některé mechanické vlastnosti oproti například

tvářeným součástí. Typickým výrobcem strojů a atomizovaných materiálů je německá firma EOS. Pro 3D tisk plastů metodou SLS je dnes hojně využíván například stroj EOS P 396. Dostupnější technologií je metoda Three Dimensional Printing (3DP), která místo spojování laserem používá spojování lepidlem, které je do prášku nanášeno inkoustovou hlavou.

Kovové výrobky se vyrábějí ze směsi kovového prášku a pojidla a po zhotovení se musí pojidlo v peci vypálit. Technologie, která je používána výhradně pro kovové materiály a jejich slitiny se nazývá Selective Laser Melting (SLM) případně Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a liší se tím, že laserový paprsek zahřívá prášek nad bod tání do stavu kapalného, tím dochází k dosažení homogennější struktury, tedy lepším mechanickým vlastnostem a nižší poréznosti povrchu výrobku. Navíc je použito částečného vakua a ochranné atmosféry inertního plynu, zejména argonu. Dnes se pro výrobu kovových komponent kromě laserového paprsku používá i technologie Electron Beam Melting (EBM), která využívá elektronový paprsek. (5)(6)(7)(9)(10)



Obrázek 3.1: Schéma metody SLS

ZDROJ: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>

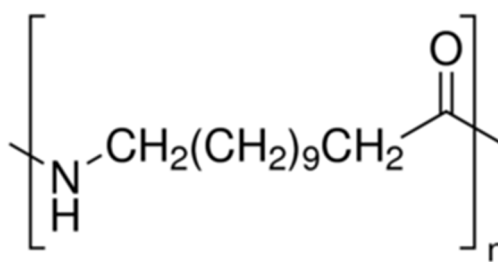


Obrázek 3.2: Výrobek z práškového polyamidu vyrobeného metodou SLS (6)

3.3 Polyamidy a PA 12

Polyamidy jsou semikrystalické, silně polární, lineární termoplasty pro inženýrské nebo speciální použití. Vyznačují se silnými mezimolekulárními silami díky tvorbě vodíkových můstků. Obsahují polární atomy kyslíku a dusíku, proto velmi snadno navlhají a dobře odolávají nepolárním rozpouštědlům. Mají poměrně vysokou pevnost, tuhost, bod tání, dobré kluzné vlastnosti, dobrou otěruvzdornost a dobrou obrobiteľnost. V navlhnutém stavu vykazují nižší pevnost, modul pružnosti, teplotu T_g , vyšší houževnatost a tažnost, proto jsou náchylné na creep. Používají se na kluzná uložení, ozubená kola, řemenice, vlákna pro lana a textilní průmysl. Tyto materiály se začaly vyvíjet v 30. letech minulého století, kdy jako první vznikl PA 66 pod názvem Nylon a poté PA 6 pod názvem Silon. Tyto plasty se používají zejména v atomizované formě pro tisk funkčních výrobků metodou SLS.

PA 12 se vyrábí polykondenzací kyseliny omega - aminolaurové nebo polymerizací laurólaktamu. Číslo 12 v označení vyjadřuje počet uhlíku v molekule výchozí monomerní látky určené pro výrobu. Strukturní vzorec toho polyamidu je vidět na *Obrázek 3.3*. Tento polyamid patří díky poměrně dlouhému uhlovodíkovému řetězci k méně navlhavým a proti chemikáliím více o odolnějším polyamidům. Materiál na této bázi dodává v atomizované formě pro 3D tisk technologií SLS například firma EOS pod obchodním názvem PA 2200, na jehož vlastnosti poukazuje *Tabulka 3.1*. Výhodou tohoto materiálu je, že je biokompatibilní v souladu s EN ISO 10993 - 1 a USP/úroveň VI/121 ° C, schválen pro styk s potravinami v souladu se směrnicí EU o plastech 2002/72/ES s výjimkou pro vysoce alkoholické potraviny. V porovnání s běžnými polyamidy se vyznačuje vysokou pevností, tuhostí, dlouhodobým konstantním chováním a nízkou hustotou. (12)(13)



Obrázek 3.3: Strukturní vzorec PA 12

ZDROJ: <http://www.geopolmonitor.com/global-nylon-12-market-2022-growth-drivers-opportunities-limitations-manufacturers-regions-forecast/>

Tabulka 3.1: Vlastnosti práškového PA 12 firmy EOS (12)

Vlastnosti PA 12 (EOS PA 2200)			
Veličina/vlastnost	Hodnota	Jednotka	Norma zkoušky
Hustota	930	kg/m ³	EOS
Tvrdost Shore D	75	-	ISO 868
Modul pružnosti v tahu v ose x, y, z	1650	MPa	ISO 527-1/-2
Teplota tání 20 °C/min	176	°C	ISO 11357-1/-3
Teplota měknutí Vicat, 50 °C/h, 50 N	163	°C	ISO 306
Deformace při přetržení v ose x, y	18	%	ISO 527-1/-2
Deformace při přetržení v ose z	4	%	ISO 527-1/-2
Vrubová houževnatost Charpy +23 °C	4,8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Rázová houževnatost Charpy, +23 °C	53	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Mez pevnosti v tahu v ose x, y	48	MPa	ISO 527-1/-2

3.4 EOS P 396

Pro tisk plastových funkčních součástí metodou SLS je v současné době na vrcholu 3D tiskárna EOS P396. Tomu také odpovídá výsledná přesnost a kvalita tištěných součástí. Bližší hodnoty základních vlastností 3D tiskárny jsou k dispozici v *Tabulka 3.2*. Tento stroj je schopen využít širokou škálu atomizovaných plastů a směsí, které produkuje také firma EOS. Jedná se o různé druhy polyamidů, PEEK a PS. Dále například CarbonMide – polyamid vyztužený uhlíkovými vlákny, PA 3200 GF – polyamid plněný skelným práškem nebo Alumid – polyamid plněný hliníkovým práškem.

Tabulka 3.2: Technické specifikace 3D tiskárny EOS P396 (6)

Veličina/vlastnost	Hodnota	Jednotka
Maximální rozměry tisknuté součásti (X × Y × Z)	340 × 340 × 620	mm
Rychlost výroby (do výšky)	22	mm/h
Rychlost snímání	až 2000	mm/s
Rychlost polohování	3000	mm/s
Tloušťka vrstvy	60–120	μm
Výkon CO ₂ laseru	80	W



Obrázek 3.4: 3D tiskárna EOS P 396

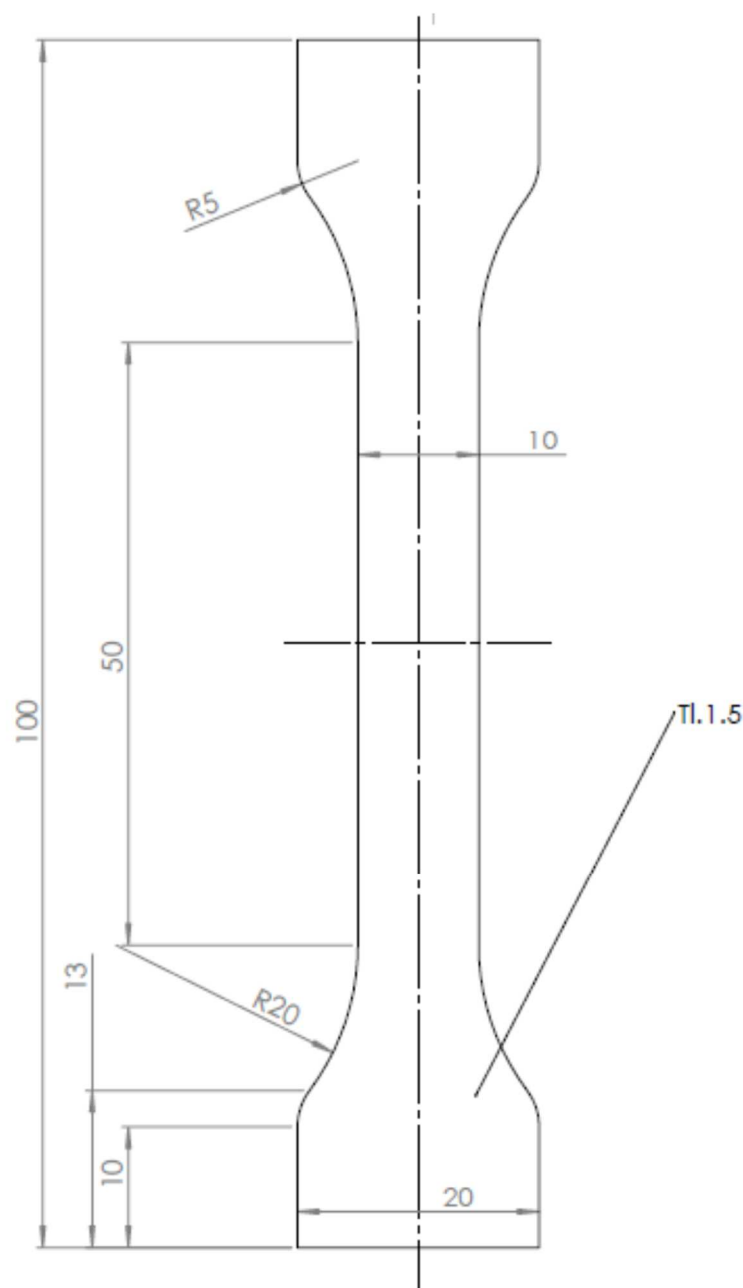
ZDROJ:

https://www.eos.info/systems_solutions/plastic/systems_equipment/eos_p_396

4 Praktická část

4.1 Návrh experimentu

V této části práce se budu zabývat ověřováním mechanických vlastností vzorků vyrobených z práškového PA 12 metodou SLS. Technologie SLS patří sice mezi nejstarší, avšak právě tato technologie je pro tisk funkčních plastových dílců ve strojírenství nejvhodnější, proto ji je třeba dále rozvíjet a zkoumat. Pro tisk byla zvolena jedna z nejmodernějších a nejzastoupenějších 3D tiskáren pro výrobu plastových součástí metodou SLS a to EOS P 396, kterou právě disponuje laboartoř aditivních technologií Protolab na VŠB – TUO. Pro tisk vzorků jsme se rozhodli použít atomizovaný polyamid na bázi PA 12 s obchodním označením EOS PA 2200, který má široké využití a je velmi často používán zejména pro výrobu funkčních součástí. Původně jsme zamýšleli využití dvouosé tahové zkoušky, avšak bylo zjištěno, že svorky daný vzorek o takové tuhosti neudrží až k mezi pevnosti. Z tohoto důvodu jsme se přiklonili k jednoosé tahové zkoušce - nejpoužívanější zkoušce ve strojírenství, která by měla mít dostatečnou vypovídající hodnotu. Tato zkouška je definována normou ISO 527 - 1 a měla by nám poskytnout hodnoty meze pružnosti, meze pevnosti, modulu pružnosti a tažnosti, které pak bude vhodné komparovat s hodnotami z materiálového listu firmy EOS. Zkušebním strojem pro jednoosou tahovou zkoušku navíc disponuje katedra Aplikované mechaniky VŠB – TUO, na rozdíl od zařízení pro dvouosé tahové zkoušky, jenž by bylo k dispozici na VUT Brno. V případě odchylek naměřených hodnot od hodnot z materiálového listu daného výrobcem EOS bude třeba zjistit příčinu, případně navrhnout vhodné řešení problému, jenž by vedlo k dosažení předpokládaných výsledků, případně k potvrzení výsledků stávajících. Pro testování jsme se rozhodli vyrobit 4 shodné zkušební vzorky, tak aby měly výsledky zkoušek požadovanou relevantnost. Tvar a rozměry vzorku vycházejí z normy pro tahové zkoušení plastů. Konečné provedení zkušební vzorku je patrné z *Obrázek 4.1*.

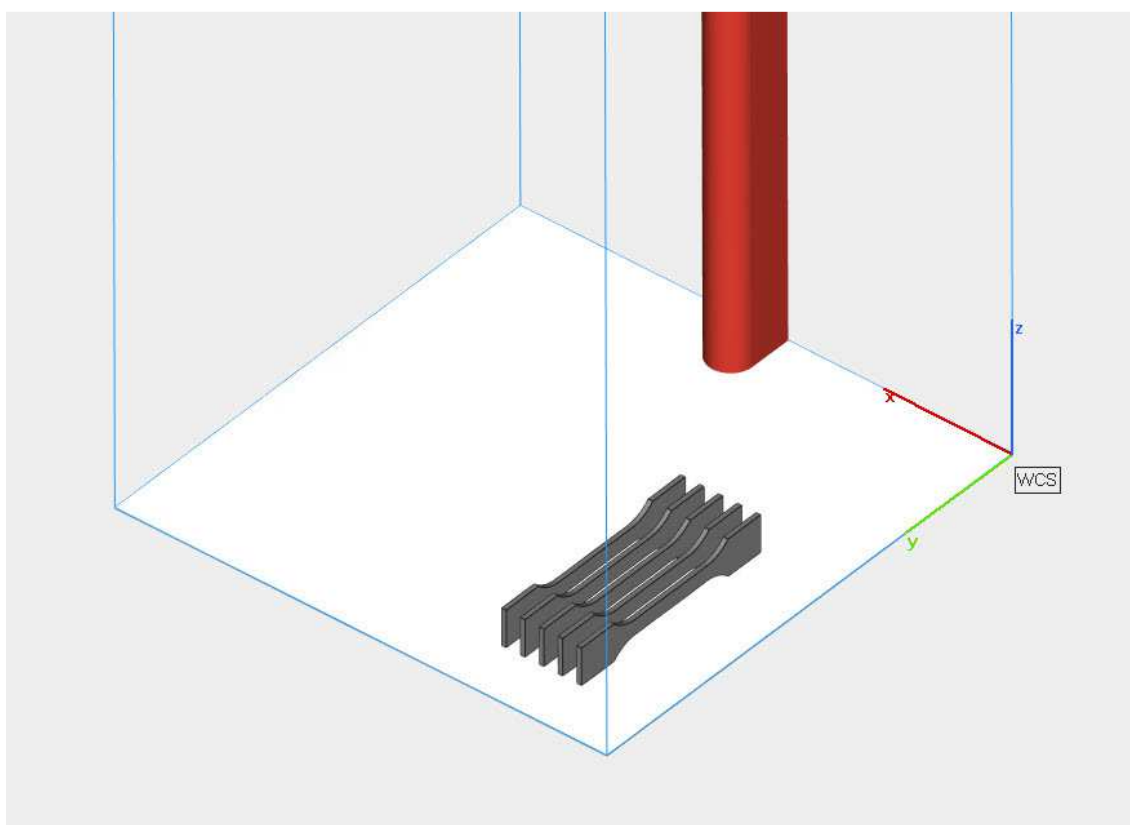


Obrázek 4.1: Výrobní výkres zkušební tyče pro zkoušku tahem PA 12

4.2 Průběh experimentu

Na 3D tiskárně EOS P 396 byly metodou SLS z práškového polyamidu PA 2200 na bázi PA12 od firmy EOS vytvořeny dle výkresové dokumentace a 3D CAD modelu 4 totožné zkušební vzorky. Tisk probíhal v laboratoři Protolab na VŠB – TUO pod vedením operátora stroje. Každý vzorek byl v komoře stroje orientován shodně a byl vyráběn za stejných podmínek. Vzorky byly při výrobě orientovány v pracovní komoře stroje dle *Obrázek 4.2*, a to tak, že jejich podélná osa byla kolmá na osu Z stroje a jejich příčná osa byla s osu Z stroje rovnoběžná. Po dokončení tisku byly vzorky ponechány v původním stavu, bez dodatečného obrábění a přesušení. I když se jedná o jeden z nejméně

navlhavých polyamidů, stále je třeba brát v potaz oproti jiným plastům zvýšenou náchylnost k navlhnutí, které může zásadně ovlivnit mechanické vlastnosti. Vyrobené vzorky byly poté postupně zatěžovány jednoosým tahem na trhačím stroji ve spolupráci s kolegy z katedry Aplikované mechaniky VŠB – TUO. Experiment probíhal pod vedením vedoucího zkušebny. Tahová zkouška byla uskutečněna dle příslušné normy pro tahovou zkoušku plastů a za standardních podmínek teploty okolí 20 °C a relativní vlhkosti 50 %. Vzorek byl upnut do čelistí stroje a zatěžován konstantně zvyšující se osovou silou a to až do přetržení vzorku. Zatěžovací síla byla podělením počátečním průřezem vzorku přepočtena na smluvní napětí. V průběhu zkoušení bylo průtahoměrem snímáno prodloužení vzorku, které bylo podělením počáteční délkou vzorku přepočteno na deformaci – poměrné prodloužení v procentech. Průtahoměr byl před koncem zkoušky odstraněn, aby nedošlo k jeho poškození a deformace při přetržení byla stanovena z počáteční a konečné vzdálenosti mezi čelistmi. Výsledkem je smluvní diagram tahové zkoušky, kde je deformace závislá na napětí.

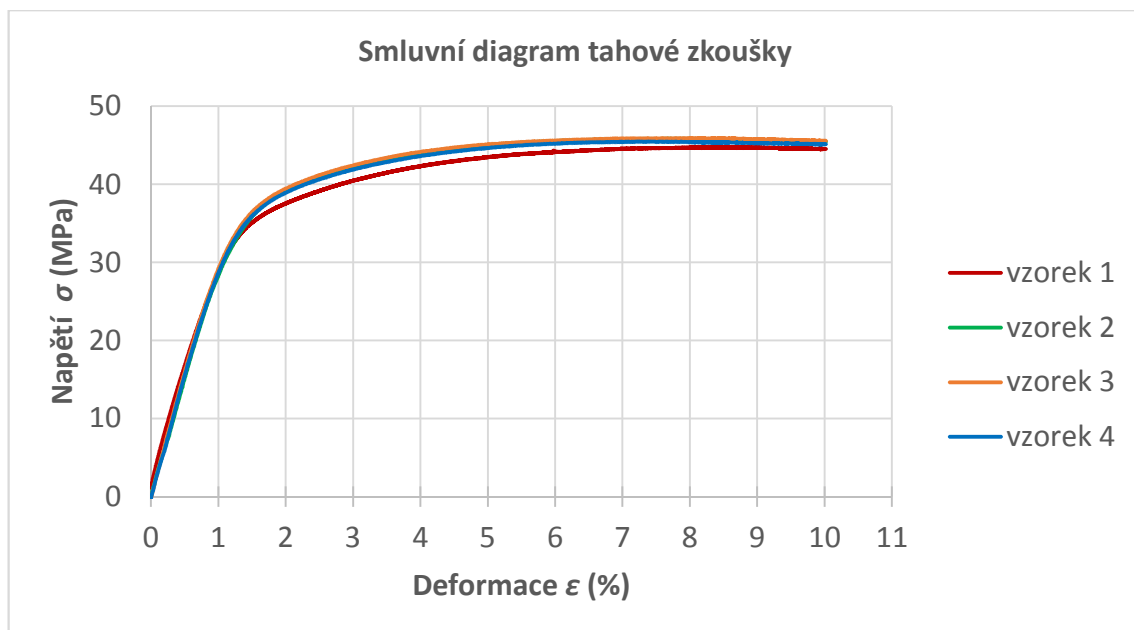


Obrázek 4.2: Poloha zkušebních vzorků v pracovní komoře 3D tiskárny

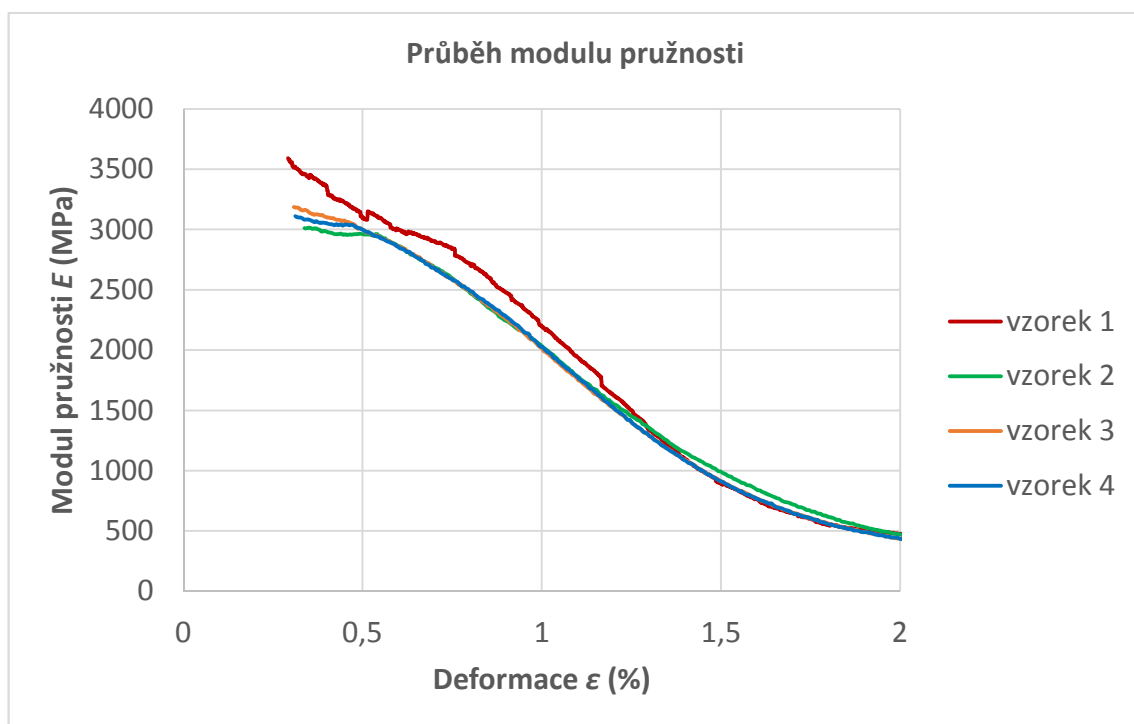
4.3 Vyhodnocení experimentu

Z výsledného diagramu (*Obrázek 4.3*) je možné vidět, jak se daný materiál chová při zatěžování jednoosým tahem od zatěžování nulovou silou až po zatížení silou, které vedla k přetržení vzorku. Výsledné mechanické charakteristiky jsou tedy napětí na mezi pevnosti, což je nejvyšší dosažené napětí při zkoušce, deformace při přetržení a maximální modul pružnosti v tahu. Z výsledků je patrné, že všechny vzorky vykazují mezi sebou homogenní vlastnosti bez signifikantních rozdílů naměřených a vypočtených hodnot mechanických charakteristik. Z tohoto plyne, že se při výrobě ani při tahové zkoušce vzorků nenaskytly žádné anomálie, které by vedly ke zkreslení výsledků. Výsledky tedy můžeme považovat za směrodatné. Z deformační křivky je patrné, že cca do 30 MPa napětí narůstá lineárně, proto zde můžeme předpokládat mez úměrnosti a mez pružnosti. Poté nastává velmi pozvolný zlom, kde se již dá mluvit o deformaci trvalé čili plastické, zde lze předpokládat také mez kluzu. Dále již křivka stoupá degresivně a to až do maximálního dosaženého napětí – meze pevnosti. Od této meze až do přetržení vzorku napětí dokonce mírně klesá. Od meze kluzu do přetržení roste deformace vzorku velmi významně, aniž by se výrazně zvyšovalo napětí. Pro dimenzování součástí je však nejdůležitější mez kluzu, což je nejmenší napětí, které již vede k podstatné trvalé deformaci. Z grafu závislosti modulu pružnosti na tažnosti je však zřejmé, že modul pružnosti při zatěžování kontinuálně klesá, z tohoto důvodu proto není možné přesně stanovit mez kluzu. Nejedná se tak o situaci jako je například v případě kovových materiálů, ale v této situaci je zapotřebí přejít na popis modulu pružnosti pomocí konstant hyperelastického materiálu, což je již mimo rámec této práce. Mez kluzu jsme však odhadli v počátcích zakřivení deformační křivky, někde na 31 MPa. Tento předpoklad jsme se rozhodli ověřit na vzorku 1 pomocí 10 silově řízených cyklů na 500 N, tedy 31 MPa, kde jsme odhadli mez kluzu. Vzorek již však vykazoval ratcheting, čili cyklickou plastickou deformaci. To potvrzuje, že mez kluzu se vyskytuje níže. Tímto testem byla ale poněkud ovlivněna i tahová zkouška vzorku 1, která pak vykazovala o cca 15% vyšší tuhost, což je třeba vzít v úvahu. Z průběhu modulu pružnosti při zatěžování (*Obrázek 4.4*) si lze všimnout změny trendu někde při 0,5 %, což na diagramu tahové zkoušky odpovídá cca 15 MPa, zde by se tedy mohla nacházet mez kluzu. Potvrdit to je však zapotřebí dalšími zkouškami, kterými se prozatím zabývá

nebudeme a můžeme v nich pokračovat v rámci jiných prací. Z výsledných hodnot všech 4 vzorků byl vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Výsledky, které jsou zaznamenány v *Tabulka 4.1*, jsou bez významných odchylek. Pouze vzorek 1 je ovlivněn cyklickou zkouškou a vykazuje tak zvýšený modul pružnosti oproti ostatním vzorkům. I přesto byl vzorek brán v úvahu a do výsledků zakomponován. Průměrná mez pevnosti v tahu je tedy 45,5 MPa a od referenčních hodnot z materiálového listu výrobce se liší jen o 2,5 Mpa. Průměrná tažnost při přetržení je 10 %, což je o 8 % nižší hodnota než hodnota referenční. Průměrný modul pružnosti je 3 225 MPa, a to je o 1 575 MPa více než referenční hodnota. Hodnota tažnosti při přetržení je tedy o 44 % nižší než referenční a hodnota modulu pružnosti je o 95 % vyšší než referenční hodnota. Je patrné, že tažnost při přetržení a modul pružnosti se od referenčních hodnot liší významně. Aby byly hodnoty srovnatelné, museli bychom zjistit, za jakých podmínek byly vzorky výrobcem EOS vyráběny, jak byly vzorky umístěny v pracovní komoře, v jakém byly stavu při zkoušení a jak zkušební vzorky vlastně vypadaly. Důležitým aspektem je jednoznačně tvar zkušebních vzorků a jejich tloušťka. Vliv tloušťky na mechanické vlastnosti může mít značný vliv, proto by ho bylo vhodné dále zkoumat. Značnou roli v rozdílnosti výsledků může hrát i výrobní poloha zkušebních vzorků v pracovní komoře vzhledem k ose Z stroje. Další možnosti, jak by mohly být vzorky rozmístěny v pracovní komoře, jsou znázorněny na *Obrázek 4.5*. Těmito podstatnými aspekty včetně bližšího vyšetření meze kluzu by se bylo možné v budoucnu dále zabývat v rámci dalších prací.



Obrázek 4.3: Smluvní diagram tahové zkoušky



Obrázek 4.4: Průběh modulu pružnosti při zatěžování

Tabulka 4.1: Výsledky experimentu

	σ_m Pevnost v tahu (MPa)	ε_t Deformace při přetržení (%)	E Modul pružnosti v tahu (MPa)
Vzorek 1	44,79	10,02	3590
Vzorek 2	45,85	10,02	3014
Vzorek 3	45,91	10,02	3186
Vzorek 4	45,47	10,02	3109
Referenční hodnoty	48	18	1650
\bar{x} Aritmetický průměr	45,51	10,02	3225
s Směrodatná odchylka	0,45	0,00	219

Výpočet aritmetického průměru pevnosti v tahu n vzorků

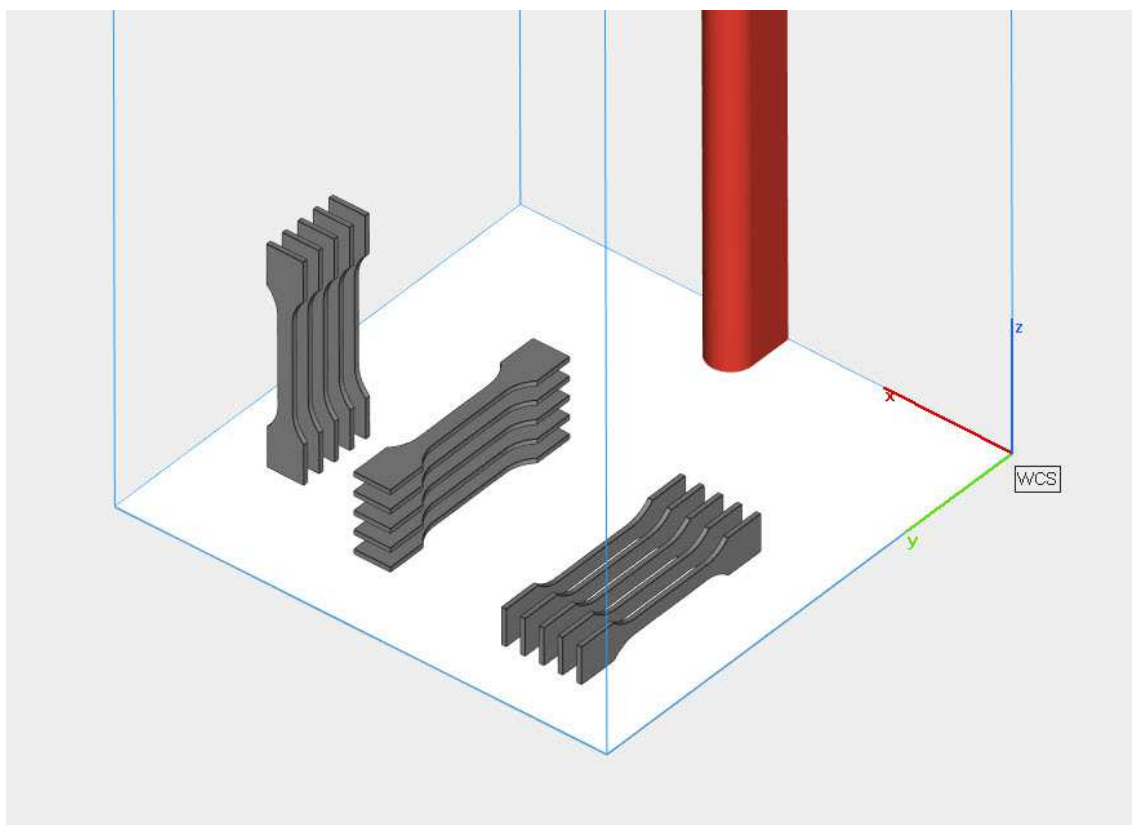
$$\begin{aligned}\bar{x}_{\sigma_m} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{mi} = \\ &= \frac{1}{4} \cdot (44,79 + 45,85 + 45,91 + 45,47) = 45,51 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.1)$$

Výpočet směrodatné odchylky pevnosti v tahu n vzorků

$$\begin{aligned}s_{\sigma_m} &= \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_{mi} - \bar{x}_{\sigma_m})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{4} \cdot [(44,79 - 45,51)^2 + (45,85 - 45,51)^2 + (45,91 - 45,51)^2 + (45,47 - 45,51)^2]} \\ &= 0,45 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.2)$$

Zápis výsledné hodnoty pevnosti v tahu vzorků

$$\sigma_m = \bar{x}_{\sigma_m} \pm s_{\sigma_m} = (45,51 \pm 0,45) \text{ MPa}\quad (4.3)$$



Obrázek 4.5: Další možnosti umístění vzorků v pracovní komoře vzhledem k ose Z

Závěr

V teoretické části této práce byly ve třech kapitolách shrnuty informace týkající se polymerů a 3D tisku. Znalosti obsažené v teoretické části jsou důležitým předpokladem pro správné provedení experimentu, jímž se zabývá praktická část této bakalářské práce. Zejména kapitola o mechanických vlastnostech plastů a jejich zkoušení a kapitola o 3D tisku má právě k praktické části práce nejblíže. Teoretická část tedy seskupila všechny relevantní poznatky z dané problematiky a splnila tak svůj účel.

Praktická část se zabírala mechanickým testováním vzorků z PA 12 vyrobených 3D tiskem metodou SLS. Nejprve byla navržena vhodná metodika zkoušení. Byla zvolena normalizovaná jednoosá zkouška tahem a na 3D tiskárně EOS P 396 byly vytvořeny 4 totožné zkušební vzorky. Po odzkoušení zkušebních vzorků byla zjištěna mez pevnosti v tahu, deformace při přetržení a modul pružnosti v tahu. Všechny testované vzorky vykazovaly homogenní chování, proto považujeme výsledky experimentu za relevantní. Mez kluzu však nebylo možné stanovit, jelikož modul pružnosti při zatěžování kontinuálně klesá. Ve výzkumu, který by vedl ke stanovení modulu pružnosti, by bylo vhodné v budoucnu dále pokračovat v rámci dalších prací. Modul pružnosti je totiž klíčový k dimenzování funkčních výrobků. Nakonec byly výsledné hodnoty mechanických vlastností komparovány s hodnotami z materiálového listu PA 12 od výrobce EOS. Od hodnot z materiálového listu se významně lišila deformace při přetržení vzorků, která byla o 44 % nižší a modul pružnosti vzorků, který byl o 95 % vyšší. Mez pevnosti se významně nelišila. Testy tedy vykazaly očekávanou pevnost v tahu a zásadně vyšší tuhost. Tyto odchylky mohou být způsobeny použitím odlišných výrobních podmínek vzorků nebo zkoušením vzorků jiných tvarů a rozměrů. Proto by bylo třeba provést další výzkum, jako je zejména zjišťování vlivu tloušťky vzorku na tuhost a vliv výrobní polohy vzorků v pracovní komoře stroje vzhledem k ose Z. S těmito anomáliemi je třeba počítat při dimenzování funkčních součástí vyrobených z daného materiálu danou výrobní technologií. Materiál dané tloušťky zpracovaný danou technologií lze tedy považovat za způsobilý k výrobě funkčních součástí, jelikož vykazoval homogenní chování, očekávanou mez pevnosti a zásadně vyšší tuhost. Praktická část tedy naplnila očekávání a splnila tak svůj cíl. Avšak vzniklo také několik otázek, na které musí odpovědět navazující výzkumy. V rámci mé diplomové práce by bylo vhodné na tuto práci dále navázat a testovat další mechanické vlastnosti a charakteristiky tohoto materiálu. Kromě

již zmiňovaného vyšetřování meze kluzu a vlivu tloušťky na tuhost bych navrhoval zabývat se například těmito dalšími důležitými zkouškami:

- zkouškou vrubové houževnatosti,
- zkouškou ohybem,
- creepovou zkouškou,
- cyklickou zkouškou.

Seznam použité literatury

- (1) HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu 1. díl*. Praha: Scienta, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
- (2) *Polymery* [online]. Liberec: Luboš Běhálek, 2014 [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- (3) *Zpracování plastů* [online]. Liberec: Petr Lenfeld [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- (4) *Plasty* [online]. Plzeň: OPI-ZCU, 2008 [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/download/plasty.pdf>
- (5) *3D Printing* [online]. Wikipedia [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- (6) *3D tisk* [online]. Ostrava: VŠB-TUO [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: <https://protolab.cz/>
- (7) *3D tisk* [online]. [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- (8) *SLA* [online]. Wikipedia [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>
- (9) *SLS* [online]. Wikipedia [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering
- (10) *SLS* [online]. Austin, 2012 [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- (11) *FDM* [online]. Wikipedia [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_Deposition_Modeling
- (12) *PA12 EOS* [online]. Německo [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: <https://www.eos.info/pa-2200-2201-da42d3327dfc8bf2>
- (13) *Nylon 12* [online]. Wikipedia [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon_12

Poděkování

Na závěr nejen mé bakalářské práce, ale i samotného bakalářského studia bych chtěl poděkovat všem lidem, díky kterým jsem se dostal až na samotný závěr, jenž nakonec úspěšně vyvrcholil mou bakalářskou prací. Poděkovat je nutno především rodině, díky které jsem dostal možnost plnohodnotně studovat.

Co se však této práce týče, prvně chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Markovi Pagáčovi Ph.D. za plnou podporu a zodpovězení všech mých otázek, které se vyskytly při tvorbě této práce a hlavně za zajištění výroby zkušebních vzorků v laboratoři aditivních technologií Protolab VŠB – TUO. Dále chci poděkovat panu Ing. Stanislavovi Polzerovi Ph.D. za zajištění mechanických zkoušek ve zkušebně Katedry aplikované mechaniky VŠB – TUO.